

DOI: 10.11779/CJGE2016S2038

# 考虑破碎的堆石料二维颗粒流数值模拟

韩洪兴, 陈伟, 邱子锋, 傅旭东\*

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 堆石料在外力作用下极易发生破碎, 基于单颗粒破碎机制, 依靠生成的颗粒簇单元克服刚性圆形颗粒模拟堆石料颗粒不能破碎的缺陷, 采用线性接触模型建立堆石料颗粒破碎的数值模型。模拟室内平面应变试验, 分析堆石料在整个加载过程中内部接触力、微裂纹和各种能量的变化, 探讨堆石料颗粒破碎的内在机制。研究表明: 颗粒簇生成的数值试样通过内部黏结力断裂更能真实反映堆石料颗粒破碎; 堆石料颗粒破碎首先发生在大粒径和接触力较大的颗粒, 并逐步向最大压应力方向发展, 最终试件内部产生剪切破裂滑动面; 在整个加载过程中, 堆石料的剪切微裂纹数大于拉伸微裂纹数, 颗粒破碎主要以剪切破坏为主, 峰值点附件产生大量颗粒破碎; 小变形情况下, 总输入能以弹性应变能的形式储存在颗粒簇内部颗粒间接触, 大变形情况下, 弹性应变能以储存-释放的形式转换其他形式耗能, 并导致其他形式耗能增加。研究成果可为研究堆石坝体变形提供参考。

**关键词:** 堆石料; 颗粒破碎; 颗粒簇; 数值模拟

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0234-06

**作者简介:** 韩洪兴(1979-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事地基处理, 土石坝结构数值仿真方面的研究。E-mail: hanhongxingvip@163.com。

## Numerical simulation of two-dimensional particle flow in broken rockfill materials

HAN Hong-xing, CHEN-Wei, QIU Zi-feng, FU Xu-dong

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Rockfill materials are easily broken under external force. Based on the single particle crushing mechanism, the indestructible defect is simulated in particle of rockfill materials depending on the generated particles cluster units to overcome rigid circular particle. A broken numerical model for particle of rockfill materials is established by adopting the linear contact model. Indoor plane strain tests are simulated. The internal contact force, micro crack and a variety of energy changes in rockfill materials are analyzed under the loading process. The breakage mechanism for particle of rockfill materials is investigated. The results show that the numerical sample generated by particle clusters can more truly reflect the breakage of particle of rockfill materials through the internal bond strength fracture. The breakage of particle of rockfill materials occurs first in the large particle size and contact force larger particles, then gradually to direction of the maximum pressure, finally shear fracture sliding plane is generated. The number of shear micro crack is greater than that of tensile micro crack throughout the whole loading process, the particle breakage mainly is shear failure, and a lot of particle breakage is produced near the peak point. The total input energy stores in particle cluster in the form of elastic strain energy under small deformation. The elastic strain energy can be converted to other forms of energy dissipation in the form of storage release under large deformation. The research results can provide reference for the study on the deformation of rockfill dams.

**Key words:** rockfill; particle breakage; particle cluster; numerical simulation

## 0 引言

堆石料是土石坝的主要填筑材料, 随着土石坝规模的不断扩大, 坝体承受的荷载也相应增加, 由此产生的颗粒破碎现象也更加明显, 颗粒破碎影响堆石料坝体的峰值强度、内摩擦角、孔隙比、渗透系数, 削弱了其剪胀性、增加其流变性<sup>[1]</sup>。国内外一些学者关于堆石料颗粒破碎进行了大量的试验研究, 主要研究

方法有单剪试验<sup>[2]</sup>、三轴压缩试验<sup>[3]</sup>、动力循环加载试验<sup>[4]</sup>等多种试验方法, 其中三轴压缩试验应用最为广泛。

近年来, 随着高土石坝的兴建, 颗粒破碎机制也

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378403, 51309028)

收稿日期: 2016-05-19

\*通讯作者(E-mail: xdfu@whu.edu.cn)

变得更加复杂,许多学者对堆石料颗粒破碎进行了室内大型三轴试验研究<sup>[5]</sup>,由于试验条件的局限性、试验成本高、耗时费力,且难以分析堆石料颗粒破碎的内部细观机制,没有得到广泛的应用,而细观数值模拟不仅能够实时动态追踪内部接触力变化、微观裂纹发展过程和能量演变规律,还可以将细观结构变化和宏观力学响应联系起来,进而从细观角度分析堆石料力学性质和变形特性。采用基于离散单元法的颗粒流仿真技术进行堆石料细观数值模拟取得了一定成果<sup>[6-7]</sup>,一般堆石料颗粒破碎的数值模拟主要集中在试验的宏观条件上,如颗粒形状、级配、破碎率、峰值强度、围压等,且大多数处于定性分析阶段,很少涉及内部机制的研究。

本文以PFC<sup>2D</sup>为载体,通过自编程及二次开发,依靠生成的颗粒簇单元克服刚性圆形颗粒模拟堆石料颗粒不能破碎的缺陷,基于单颗粒破碎机制,采用线性接触模型建立堆石料颗粒破碎数值模型,分析堆石料在整个加载过程试件内部接触力、裂纹和能量的演变过程,着重从堆石坝体内部探讨堆石料颗粒破碎的内在机制,为进一步研究堆石坝体的变形提供参考。

## 1 考虑堆石料颗粒破碎的数值模型

颗粒流仿真技术模拟颗粒破碎一般分为两种方法:①采用有限元-离散元耦合分析方法<sup>[8]</sup>,即在空间内随机生成任意形状颗粒,再压缩成指定大小的试样,当颗粒的受力状态满足一定条件时颗粒发生破碎;②离散元法<sup>[9-11]</sup>,即将多个颗粒通过黏结键黏结在一起形成颗粒簇单元,替代试件的原颗粒,当黏结处的切向或法向黏结强度大于相应极限黏结强度时颗粒发生破碎。

单颗粒破碎一般采用巴西圆盘劈裂试验或单轴抗压试验来进行颗粒流数值模拟,许多学者认为颗粒的破碎形式分为拉裂破坏或剪切破坏。对于堆石料颗粒产生的拉裂破坏,结合杨贵等<sup>[9]</sup>关于堆石料颗粒破碎的研究成果和WeiZhuo等<sup>[12]</sup>数值模拟研究成果,本文采用Oliver等<sup>[10]</sup>根据圆盘劈裂原理建立的拉裂破坏准则:

$$2T - P \geq \sigma_{\text{critt}} \quad , \quad (1)$$

$$T = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}})/2 \quad , \quad (2)$$

$$P = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}})/2 \quad 。 \quad (3)$$

式中  $T$  为颗粒剪应力;  $P$  为颗粒平均应力;  $\sigma_{\text{max}}$  为颗粒最大主应力;  $\sigma_{\text{min}}$  为颗粒最小主应力;  $\sigma_{\text{critt}}$  为颗粒极限抗拉强度。

$$\sigma_{\text{max,min}} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2}{2} + \tau_{xy}^2} \quad , \quad (4)$$

$$\sigma_{xx} = \sum_{i=1}^N \frac{F_x^i}{\pi R} \quad , \quad (5)$$

$$\sigma_{yy} = \sum_{i=1}^N \frac{F_y^i}{\pi R} \quad , \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{critt}} = \sigma_{\text{fm}} \left( \frac{d_M}{d} \right) \quad 。 \quad (7)$$

式中  $\sigma_{xx}$  为颗粒 $x$ 方向的正应力;  $\sigma_{yy}$  为颗粒 $y$ 方向的正应力;  $\tau_{xy}$  为颗粒 $xy$ 方向的剪应力;  $N$  为颗粒周围接触数目;  $F_x^i$  为颗粒周围某一接触 $x$ 方向的力;  $F_y^i$  为颗粒周围某一接触 $y$ 方向的力;  $R$  为颗粒半径;  $d_M$  为最大颗粒直径;  $d$  为颗粒直径;  $\sigma_{\text{fm}}$  为最大颗粒直径 $d_M$ 的抗拉强度。

对于堆石料颗粒产生的压裂破坏,结合BEN-NUM等<sup>[11]</sup>数值模拟研究成果,当颗粒所受的应力状态满足一定条件时,发生压裂破坏,即

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \geq \sigma_{\text{critc}} \quad , \quad (8)$$

$$\sigma_i = F_i / \pi R \quad , \quad (9)$$

式中,  $N$  为颗粒周围接触数目,  $\sigma_i$  为颗粒周围某一接触法向应力,  $\sigma_{\text{critc}}$  为颗粒极限抗压强度,  $F_i$  为颗粒周围某一接触法向力,  $R$  为颗粒半径。

$$\sigma_{\text{critc}} = \sigma_{\text{fm}} \left( \frac{d_M}{d} \right) f_{\text{CN}} f_{\text{D}} \quad , \quad (10)$$

$$f_{\text{CN}} = (N-1)e^{(D/d)((N-2)(N-3)/4N)} \quad , \quad (11)$$

$$f_{\text{D}} = \frac{D/d}{D/d+1} \quad 。 \quad (12)$$

式中  $f_{\text{CN}}$  为颗粒接触影响系数;  $f_{\text{D}}$  为颗粒直径影响系数;  $D$  为当前颗粒周围接触颗粒平均直径,当颗粒周围接触对象为墙体时,  $D \rightarrow \infty$ , 此时  $f_{\text{D}}=1$ 。

数值模拟过程对颗粒周围接触个数进行数值分析,当颗粒周围接触数目  $N \leq 2$  时,颗粒发生拉裂破碎;当颗粒接触数目  $N > 2$  时,颗粒发生拉裂破碎或压裂破碎。因此,颗粒簇模拟堆石料颗粒破碎必须要保证颗粒簇内部颗粒接触数目  $N > 2$ 。考虑初始孔隙率对数值模拟结果影响较大,采用颗粒簇替代圆形颗粒应将其内部产生的孔隙看作颗粒簇单元面积,同时遵循质量和面积等效原则:

$$\rho_l = \rho_0 S_0 / \sum_{i=1}^n S_i \quad , \quad (13)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n S_i + A \quad 。 \quad (14)$$

式中  $\rho_l$  为颗粒簇内部小颗粒密度,  $\rho_0$  为原颗粒密度;  $S_0$  为原颗粒面积,  $S_i$  为颗粒簇内部颗粒面积,  $n$  为颗粒簇内部颗粒数目,  $A$  为生成颗粒簇产生的内部孔隙。

模拟堆石料的颗粒族内部相邻颗粒间通过设置连接键限制相对滑动,采用线性接触模型计算,接触力大小与颗粒间重叠量有关,为了保证不产生附加的不平衡力,初始生成的颗粒族内部相邻颗粒两两相切。当颗粒间所承受法向或切向接触力大于相应极限强度时连接便会断裂,堆石料颗粒发生破碎。本次数值模拟颗粒簇单元由4个半径相等的圆形颗粒黏结而成,共5个初始黏结,图1表示颗粒簇的形成和破碎示意图,小圆代表圆形颗粒,黑色细线代表连接存在,黑色粗线代表连接断裂。

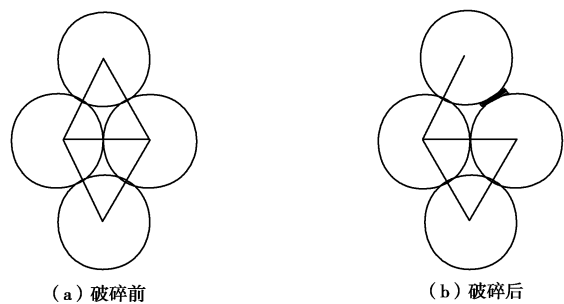


图1 颗粒破碎示意图  
Fig. 1 Sketches of particle crushing

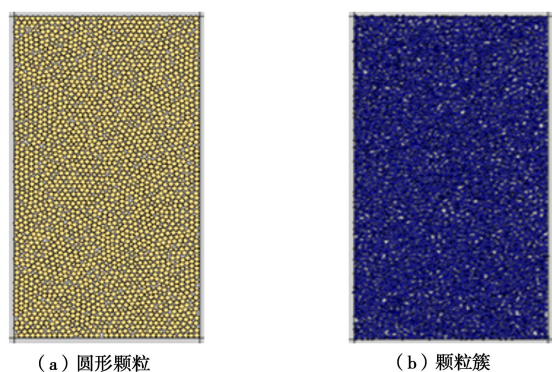


图2 数值试样模型图  
Fig. 2 Model of numerical sample

2 数值结果验证

数值结果验证主要是能够模拟真实的室内试验曲线,考虑多数堆石坝体低围压区域较少,堆石料颗粒破碎多集中在坝体的中下部高围压区域,因此本文选取1.0 MPa和1.7 MPa围压下进行双轴数值模拟试验。在模拟过程中,为了提高计算效率采用最小半径 $R_{\min}=0.075\text{ m}$ ,最大半径 $R_{\max}=0.1\text{ m}$ ,按均匀法生成2574个颗粒簇单元,试样尺寸为 $6\text{ m}\times 12\text{ m}$ 。图2为数值模拟过程中生成的圆形颗粒和颗粒簇试样,图3为数值试验与Marsal<sup>[13]</sup>室内研究的玄武岩试验数据对比。

如图3可知,本文数值模拟得到的应力-应变曲线与Marsal<sup>[13]</sup>室内平面应变曲线变化趋势一致,且强度相同,故可认为本次选取的细观参数能够反映玄武岩

堆石料颗粒破碎的宏观力学特性,在此细观参数的基础上进行堆石料颗粒流数值模拟是合理的,细观参数如表1所示。

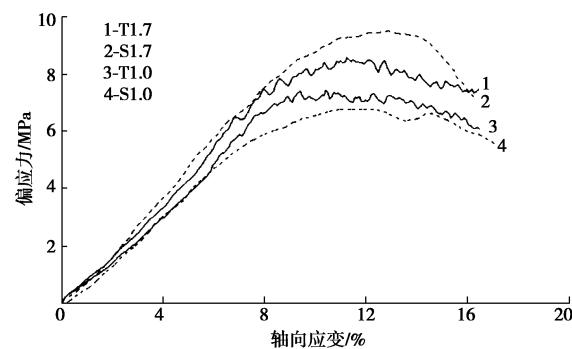


图3 数值试验与室内试验结果对比  
Fig. 3 Comparison between numerical test and lab test results

表1 细观参数汇总表  
Table 1 Collection of mesoscopic parameters

$k_n$	$k_s$	$k_n^{w1}$	$k_n^{w2}$	$b_n$	$b_s$	$\mu$
$/(MN\cdot m^{-1})$	$/(MN\cdot m^{-1})$	$/(MN\cdot m^{-1})$	$/(MN\cdot m^{-1})$	$/kN$	$/kN$	
298	298	29.8	298	61	61	0.43

注:  $k_n$ ,  $k_s$  分别为颗粒法向刚度和切向刚度;  $k_n^w$  为墙体法向刚度;  $b_n$ ,  $b_s$  分别为颗粒法向连接强度和切向连接强度;  $\mu$  为摩擦系数。

3 模拟结果分析

3.1 内部接触力的演化

选取轴向应变为0.00, 3.92%, 11.28%和16.21%所对应的接触应力特征图,分析试件在整个加载过程中拉、压应力的变化规律及试件的破坏过程。轴向应变0.00为加载起始点,轴向应变3.92%为裂纹起裂点,轴向应变11.28%为峰值应力点,轴向应变16.21%为加载结束点。图4为不同加载时刻在围压1.7 MPa时数值试样内部接触力特征图,试件中黑色代表压应力,红色代表拉应力,线条粗细代表接触力大小。

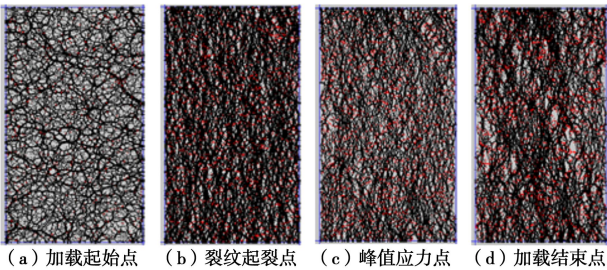


图4 数值试样内部接触力特征图  
Fig. 4 Characteristic diagrams of internal contact force in numerical sample

从图4可知,轴向应变为0.00时,试件中的颗粒仅受到固结应力作用,粒径大的颗粒周围压应力较大,

整体试件颗粒间接触力较小, 并以压应力为主; 随着轴向应力的增加, 接触力显著增大, 当轴向应变为 3.92% 时, 部分颗粒簇内部颗粒间接触力达到最大值, 但应以压应力为主; 随着轴向应力继续增加, 试件颗粒间接触力变小, 原因是部分颗粒簇内部颗粒间产生断裂, 当轴向应变为 11.28% 时, 裂纹周围接触力向外扩展, 应力量值变小; 随着轴向应力继续增加, 试件内部裂纹逐步贯通, 并向最大压应力方向发展, 当轴向应变为 16.21% 时, 试件内部裂纹贯通并形成剪切破裂滑动面, 应力集中释放, 试件中的应力转移到未破碎的颗粒间, 相应量值变大。

### 3.2 微裂纹发展过程

堆石料内部微裂纹的产生与声发射直接相关, PFC<sup>2D</sup> 模型中一个链接断裂会产生一次应变能的释放, 即发生了一次声发射<sup>[14]</sup>, 通过统计颗粒链接断裂数即可模拟堆石料颗粒破碎的声发射试件, 利用声发射技术来研究堆石料内部微裂纹的发展过程成为一种有效手段, 图5为围压1.7 MPa时声发射数与轴向应变的关系, 图6为围压1.7 MPa时偏应力和微裂纹数目与轴向应变的关系。

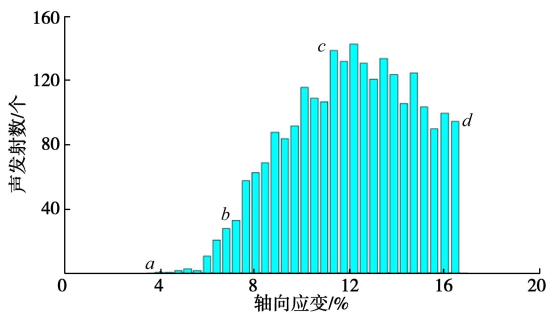


图5 声发射数与轴向应变的关系

Fig. 5 Relationship between AE counts and axial strain

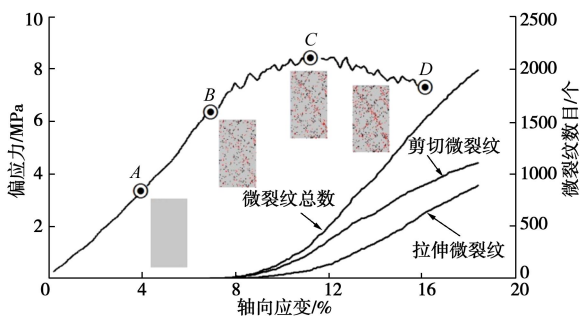


图6 偏应力和微裂纹数目与轴向应变的关系

Fig. 6 Relationship among deviator stress, number of microcracks and axial strain

为了研究试件内部微裂纹的演化过程, 在图6偏应力-轴向应变曲线设置4个监测点及对应各种微观信息特征图(与图5的4个点一一对应), 其中A点为裂纹起裂点; B点为屈服点; C点为峰值应力点; D

点为加载结束点。在微观信息特征图中, 红色代表剪切破坏, 黑色代表拉伸破坏, 这里所说的剪切破坏是指接触力大于颗粒极限抗压强度, 拉伸破坏是指接触力大于颗粒极限抗拉强度。

从图6可知, 加载初始阶段, 试件的应力-应变曲线呈线性关系, 没有微裂纹产生, 此过程堆石料处于弹性变形阶段。对照图5, 在监测点A, 试件内部开始产生第一条微裂纹, 在声发射过程中定义为初始发射点a(裂纹起裂点), 该微裂纹的位置发生在上部墙体附近, 说明应力集中首先发生在上部墙体附近; 从初始发射点a到屈服点b, 声发射数整体呈增加趋势, 对应的微裂纹数也相应增加, 在监测点B, 试件内部存在大量无规律分布的微裂纹, 原因是大粒径和接触力较大的颗粒首先发生断裂, 产生的微裂纹逐步向两侧发展, 此过程剪切微裂纹数大于拉伸微裂纹数, 试件处于剪切破坏为主; 从屈服点b到峰值应力点c, 声发射数整体处于快速增加趋势, 对应的微裂纹数也快速增加, 在监测点C, 试件内部产生一条与轴向大致成45°倾角的裂隙, 由于应力逐步分散到相应临近的颗粒簇单元, 微裂纹也逐步向两侧发展, 此过程剪切微裂纹数大于拉伸微裂纹数, 试件应处于剪切破坏为主; 从峰值应力点c到加载结束点d, 声发射数呈现较高频数, 整体处于下降趋势, 但微裂纹总数继续增加, 在监测点D, 试件内部已形成完全贯通的断裂带, 此过程试件处于剪切破坏为主。堆石料在整个加载过程中, 试件内部的裂纹经历了萌生、发育、扩展和汇合的发展过程, 最终产生宏观剪切破坏滑动面。

### 3.3 加载过程能量的演变

堆石料是一种复杂的不连续介质, 剪切过程中的响应是颗粒间摩擦、颗粒破碎、颗粒变形、颗粒运动等综合作用的结果<sup>[8]</sup>, 同时伴随着各种能量的交换和耗散, 其中包括颗粒破碎耗能、颗粒弹性变形能、颗粒间摩擦耗能和颗粒动能。在整个加载过程将试样视为封闭系统, 并假设整个系统不与外界发生能量交换, 外力功(上下加压板所做的功)所产生的总输入能为 $U$ , 则根据热力学第一定律可得

$$U = U_c + U_d + U_k + U_f \quad (15)$$

式中,  $U_c$  为颗粒弹性变形能,  $U_d$  为颗粒破碎耗能;  $U_k$  为颗粒动能;  $U_f$  为颗粒摩擦耗能。

PFC<sup>2D</sup> 双轴压缩模型试验的上下压板仅有轴向线位移, 外力功所产生的总输入能 $U$ 也可按下式求得

$$U = U_{prc} + (F_1 \Delta U_1 + F_2 \Delta U_2) \quad (16)$$

式中  $U_{prc}$  为上一时刻总输入能,  $F_1$  为当前时刻上压板外力,  $F_2$  为当前时刻下压板外力,  $\Delta U_1$  为相邻时刻上压板位移,  $\Delta U_2$  为相邻时刻下压板位移。

在线性接触模型中, 颗粒间储存和释放的弹性变形能为弹性应变能, 可由下式求得

$$U_c = \frac{1}{2} \sum_{N_c} \left( \frac{|F_i^n|^2}{k^n} + \frac{|F_i^s|^2}{k^s} + \frac{(M_i)^2}{k_m} \right), \quad (17)$$

式中,  $F_i^n$  为颗粒法向接触力;  $F_i^s$  为颗粒切向接触力;  $M_i$  为颗粒接触弯矩;  $k^n$  为颗粒法向刚度;  $k^s$  为颗粒切向刚度;  $k_m$  为颗粒转动刚度;  $N_c$  为颗粒接触数目。

在整个加载过程中, 动能也是状态量, 按运动颗粒进行统计, 计算公式如下:

$$U_k = \frac{1}{2} \sum_{N_p} [m_i (U_i^c)^2 + I_i (\theta_i^c)^2] \quad (18)$$

式中  $N_p$  为颗粒数量;  $m_i$  为颗粒质量;  $I_i$  为颗粒惯性矩;  $U_i^c$  为颗粒平动速度;  $\theta_i^c$  为颗粒转动速度。

加载过程中, 摩擦耗能是颗粒在滑动中所消耗的能量, 发生在弹性和塑性变形阶段, 可按式求得

$$U_f = \sum_{N_c} \left( \langle F_i^s \rangle (\Delta U_i^s)^{slip} \right) \quad (19)$$

式中  $\langle F_i^s \rangle$  为相邻时刻切应力增量;  $(\Delta U_i^s)^{slip}$  为相邻时刻滑动位移增量;  $N_c$  为颗粒接触数目。

将式 (16) ~ (19) 代入式 (15), 即可求出颗粒破碎耗能。

根据数值模拟试验的客观力学响应, 将堆石料的总输入能和各种能量的转换过程分为 4 个阶段, 图 7 为围压 1.7 MPa 时偏应力和体应变与轴向应变关系, 图 8 为围压 1.7 MPa 时各种能量与轴向应变关系。

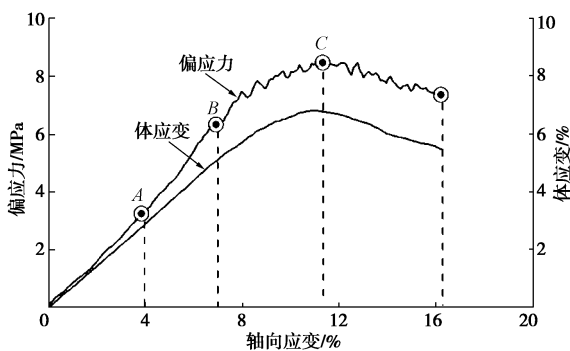


图 7 偏应力和体应变与轴向应变的关系

Fig. 7 Relationship among deviator stress volume strain and axial strain

由图 7, 8 可知, 第一阶段 (OA 段), 颗粒弹性变形能伴随总输入能快速增加, 摩擦耗能很小, 破碎耗能为 0, 试件体积呈现剪缩, 主要是大小颗粒相互挤压、相互嵌入, 填充孔隙, 颗粒更加密实, 致使体积变小, 此过程总输入能以弹性应变能的形式储存在颗粒簇内部颗粒间接触, 颗粒没有发生破碎, 压缩过程堆石料颗粒仅发生弹性变形; 第 2 阶段 (AB 段), 弹性变形能和总输入能快速增加, 二者差值逐渐变大,

颗粒摩擦耗能和破碎耗能逐步增加, 试件体积也呈现剪缩, 此过程堆石料除了发生弹性变形之外, 少量颗粒发生破碎, 压缩过程堆石料伴随少量塑性变形; 第 3 阶段 (BC 段), 弹性变形能缓慢增加到最大值, 颗粒摩擦耗能和破碎耗能快速增加, 试件体积先剪缩后膨胀, 主要是堆石料颗粒破碎形成大量小颗粒来填充孔隙使体积变小, 随着颗粒破碎越来越多, 堆石料内部颗粒发生翻滚、爬升等现象导致体积膨胀, 同时大量颗粒破碎也增加内部颗粒比表面积, 使颗粒摩擦耗能快速增加, 此过程堆石料主要发生塑性变形, 大量颗粒发生破碎; 第 4 阶段 (CD 段), 弹性变形能逐渐减小, 总输入能、颗粒摩擦耗能和颗粒破碎耗能快速增加, 试件体积变大, 颗粒间接触数目减少, 从而使储存的弹性变形能处于释放阶段, 随着堆石料颗粒破碎的继续进行, 最终形成宏观剪切断裂带, 此过程堆石料仍以塑性变形为主, 试件体积呈现剪胀。动能在整个加载过程中, 远小于总输入能和其它形式耗能, 证明整个试件在加载过程处于准静态。

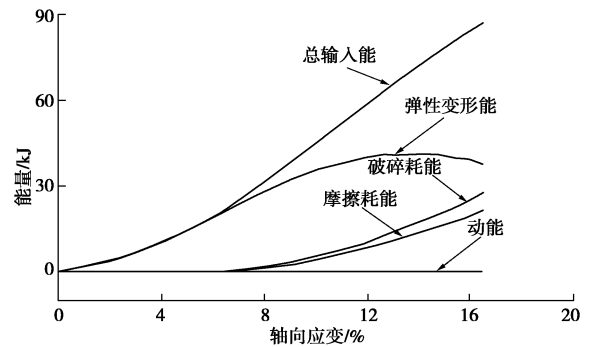


图 8 能量与轴向应变的关系

Fig. 8 Relationship between energy and axial strain

## 4 结 论

(1) 本文以 PFC<sup>2D</sup> 为载体, 通过自编程及二次开发, 依靠生成的颗粒簇单元克服刚性圆形颗粒模拟堆石料颗粒不能破碎的缺陷, 并通过颗粒簇内部黏结力的断裂来反映堆石料颗粒破碎。

(2) 堆石料颗粒破碎首先发生在大粒径和接触力较大的颗粒, 并逐步向最大压应力方向发展, 最终试件内部产生剪切破裂滑动面, 应力集中释放, 并导致相邻未破碎的颗粒间应力值增加。

(3) 堆石料在整个加载过程中剪切微裂纹数大于拉伸微裂纹数, 颗粒破碎主要以剪切破坏为主, 在峰值点附近出现较高的声发射数, 说明堆石料在峰值点附近产生大量的颗粒破碎。

(4) 小变形情况下, 总输入能以弹性应变能形式储存在颗粒簇内部颗粒间接触, 摩擦耗能和动能相对

较小, 破碎耗能为 0。大变形情况下, 弹性应变能以“储存—释放”的形式转变其他形式耗能, 从而导致摩擦耗能和破碎耗能逐渐增加。

### 参考文献:

- [1] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [2] 刘尧, 卢延浩. 粗粒土大型单剪颗粒破碎试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(2): 175 - 178. (LIU Yao, LU Yan-hao. Large-scale simple shear tests of particle breakage of coarse-grained soil[J]. Journal of Ho-hai University (Natural Sciences), 2009, **37**(2): 175 - 178. (in Chinese))
- [3] HARDIN B O. Crushing of soil particle[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [4] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 紫坪铺面板坝堆石料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 35 - 40. (KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rockfill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 35 - 40. (in Chinese))
- [5] 陈生水, 韩华强, 傅华. 循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, FU Hua. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (in Chinese))
- [6] CHENG Y P, BOLTON M D and NAKATA Y. Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM[J]. GEOTECHNIQUE, 2004, **54**(2): 131 - 141.
- [7] 邵磊, 迟世春, 张勇, 等. 基于颗粒流的堆石料三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 711 - 720. (SHAO Lei, CHI Shi-chun, ZHANG Yong, et al. Study of triaxial shear tests for rockfill based on particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 711 - 720. (in Chinese))
- [8] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 堆石体三轴剪切试验的三维细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 746 - 753. (MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. 3D mesoscopic numerical simulation of triaxial shear tests for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 746 - 753. (in Chinese))
- [9] 杨贵, 许建宝, 刘昆林. 粗粒料颗粒破碎数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3301 - 3306. (YANG Gui, XU Jian-bao, LIU Kun-lin. Numerical simulation of particle breakage of coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3301 - 3306. (in Chinese))
- [10] OLIVIER T D V, JEAN-CLAUDE C. Numerical model of crushing of grains inside two-dimensional granular materials[J]. Powder Technology, 1999(105): 190 - 198.
- [11] BEN-NUM O, EINAV I. The role of self-organization during confined comminution of granular materials[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2010, **36**(8): 231 - 247.
- [12] ZHOU Wei, YANG Li-fu, MA Gang, et al. Macro-micro responses of crushable granular materials in simulated true triaxial tests[J]. Granular Matter, 2015, **17**(4): 497 - 509.
- [13] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill[M]. New York: Wiley, 1973: 109 - 200.
- [14] 宿辉, 党承华, 李彦军, 等. 考虑不均质度的岩石声发射数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1886 - 1890. (SU Hui, DANG Cheng-hua, LI Yan-jun, et al. Study of numerical simulation of acoustic emission in rock of inhomogeneity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1886 - 1890. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)